

EK-WLI 法による実地盤の 非線形履歴復元力の同定

篠原充¹・原井大輔²・澤田勉³

¹ 学生員 徳島大学大学院学生(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

² 正会員 日本構造技術研究所(〒112-0011 東京都文京区千石 4-14-10)

³ 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町 2-1)

本研究は、カルマンフィルタの重み付きローカルな繰り返し法(EK-WLI 法)を用いて、1自由度非線形系を等価線形的に同定する手法を実地盤に適用させ、強震動鉛直アレー観測記録を使用して、土の非線形履歴復元力特性の推定を行い、本手法の妥当性を検討したものである。また、兵庫県南部地震により液化した神戸ポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いて、液化化時における土の非線形履歴復元力特性の推定を行う。

Key Words : Identification , Equivalent linear system , Extended Kalman filter , The EK-WLI method

1. はじめに

近年地震観測体制が強化され、多くの観測記録が収集されるにつれて、これらの観測記録から、地震時における地盤や構造物の動特性を推定しようとする研究が盛んに行われるようになった。振動系の観測記録からその動特性を推定することは、一般に同定と呼ばれる。つまり、同定とは、入出力が測定可能な場合、その中のシステムパラメータを推定しようとするものである。

振動系の同定手法のうち、非線形系を等価線形的に同定する手法は、非線形パラメータを直接同定できないという欠点はあるが、手法的には簡単である^{1)~4)}。また、同定された等価線形パラメータを用いることにより履歴復元力特性を間接的に同定できるため、従来の研究に対する補完的な手法として有用であると考えられる。

ところで、EK-WLI 法を用いた1自由度非線形系の等価線形的同定では、非線形性を表わすモデルとして Bi-linear モデルを用いた場合に、履歴復元力特性を間接的に推定できることが示されている¹⁾。しかし、実観測記録を用いた履歴復元力特性の推定は行われていない。

本研究では、EK-WLI 法を用いて1自由度非線形

系を等価線形的に同定する手法を実地盤に適用させ、強震動鉛直アレー観測記録を使用して、土の非線形履歴復元力特性の推定を行なう。

特に、兵庫県南部地震により液化した神戸ポートアイランドの鉛直アレー観測記録を用いて、液化化時における土の非線形履歴復元力特性を推定し、若干の考察を加えた。

2. 同定問題の定式化

(1) 同定の手順

本研究では、土の非線形履歴復元力を推定するため、観測記録として鉛直アレー観測記録を用いる。これは、地盤中に深度方向へ鉛直に設置された地震計により、同時観測された絶対加速度記録である。

図-1に同定の手順を示す。まず、アレー観測地点の地盤をモデル化する。観測記録としては、地表から①番目と②番目の地震計で観測された記録を用い、地表から②番目の記録を入力、①番目の記録を応答とすることにより、地盤を1自由度系としてモデル化する。同定モデルは、図(b)に示す1自由度等価線形系とする。

同定モデルである等価線形系の運動方程式から状態方程式を作成し、また、観測記録から観測方程

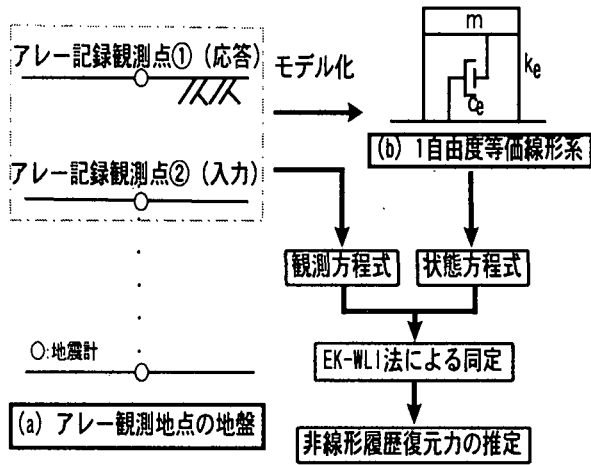


図-1 同定の手順

式を作成する。そして、これら2つの方程式を用いてEK-WLI法により同定を行う。

(2) 履歴復元力の推定

前述の等価線形的な同定では、非線形パラメータを直接推定することはできない。しかし、等価線形パラメータを用いることにより、間接的に履歴復元力特性を推定することはできる。

1自由度非線形系の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{z}(k) + c\dot{z}(k) + Q\{z(k)\} = c\dot{z}_0(k) + Q\{z_0(k)\} \quad (1)$$

ここで、 m ：質量、 c ：粘性減衰係数、 $Q(k)$ ：復元力、 $z(k)$ 、 $\dot{z}(k)$ 、 $\ddot{z}(k)$ ：応答の絶対加速度、絶対速度、絶対変位、 $z_0(k)$ ：入力地震動の絶対加速度である。

履歴復元力は相対変位の関数として表わされるため、ここでは相対加速度 $\ddot{y}(k)$ 、相対速度 $\dot{y}(k)$ および相対変位 $y(k)$ を用いる。これらは式(1)に用いた絶対加速度、絶対速度、および絶対変位により、次式で表わされる。

$$\begin{cases} \ddot{y}(k) = \ddot{z}(k) - \ddot{z}_0(k) & (2) \\ \dot{y}(k) = \dot{z}(k) - \dot{z}_0(k) & (3) \\ y(k) = z(k) - z_0(k) & (4) \end{cases}$$

上記の相対応答を用いると、非線形系の運動方程式は次式で表わされる。

$$m\ddot{y}(k) + c\dot{y}(k) + Q\{y(k)\} = -m\ddot{z}_0(k) \quad (5)$$

また、等価線形系の運動方程式は次のようになる。

$$m\ddot{y}(k) + c_e\dot{y}(k) + k_e y(k) = -m\ddot{z}_0(k) \quad (6)$$

ここで、 k_e ：等価ばね定数、 c_e ：等価減衰係数である。以上より、履歴復元力が次式より得られる。

$$Q\{y(k)\} = c_e\dot{y}(k) + k_e y(k) - c\dot{y}(k) \quad (7)$$

ここで、粘性減衰係数 c は地震動の振幅が小さい初期の振動記録より同定される。他方、等価減衰係数 c_e および等価ばね定数 k_e と、応答 $\dot{y}$ および y の各時刻における値は、次節で述べるEK-WLI法により同定される。

以上のようにして同定された等価線形パラメータおよび応答を式(7)に代入することにより、履歴復元力を推定することができる。

3. EK-WLI 法⁴⁾

非線形系の同定では、パラメータの時間変動に追従する手法を用いることが必要である。ここでは、その追従性を有する手法の1つである、カルマンフィルタの重み付きローカルな繰り返し法(EK-WLI法)について述べる。

一般のカルマンフィルタによる推定値は、時間が経過するとパラメータが一定値に収束するため、非線形パラメータの時間変動に追従できない。そこで、各時刻でのローカルな繰り返しに重みを導入し、パラメータの時間変動に対する追従性を改善した方法が、EK-WLI法である。

以下では、EK-WLI法の適用法について説明する。

いま、時刻 $k+1$ におけるカルマンフィルタのローカルな繰り返しを考える。時刻 k での状態量 $X(k)$ とその誤差共分散行列 $P(k)$ が既知であるとき、時刻 $k+1$ での状態推定量 $X(k+1)$ は次のようにして求められる。

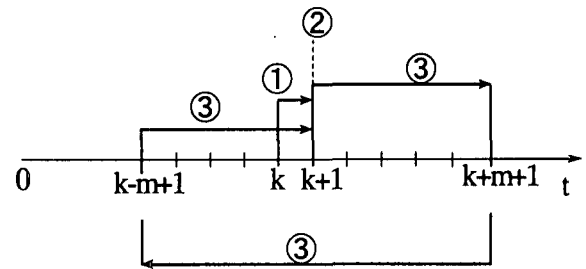


図-2 ローカルな繰り返しの方法

- ① 拡張カルマンフィルタを用いて、時刻 $k+1$ での状態推定量 $X'(k+1)$ とその誤差共分散行列 $P_1(k+1)$ を求める。
- ② 得られた $P_1(k+1)$ に重み r を乗じて誤差共分散行列を修正する。
- ③ 上で求めた $X'(k+1)$ と $P'(k+1)$ を用いて、図-2に示すように、時刻 $k+1 \rightarrow k+m+1 \rightarrow k-m+1 \rightarrow k+1$ の順に拡張カルマンフィルタを用いて、各時刻での最

適状態推定量とその誤差共分散行列を求めている。

- ④ 過程③を n 回繰り返す、最終的に時刻 $k+1$ での最適状態推定量 $X(k+1)$ とその誤差共分散行列 $P(k+1)$ を得る。

以上のような重み付きローカルな繰り返し法のポイントは、次の4点である。

- 1) 時刻 $k+1$ での誤差共分散行列に乗じる重み: r
- 2) 時刻 $k+m+1 \rightarrow k-m+1$ における状態量の推移 (後退過程) の表現法
- 3) ローカルな繰り返しにおける解析データ数: $4m$
- 4) ローカルな繰り返し数: n

これらのうち、1) の重み r は、前後の状態推定量の関係を切り、追従性を良くするために必要である。 r が大きいほど追従性の良い同定ができるが、収束性は悪くなる。

2) の後退過程の推移は、前述の状態方程式における離散時間間隔 Δt を $-\Delta t$ と置くことで表現できる。

3) の m については、 m が小さい場合には時刻毎に独立なデータを用いる割合が多くなるため状態量の追従性は良くなるが、同定値に及ぼすノイズの影響が大きくなる。反対に、 m が大きくなるとノイズの影響は小さくなるが、時刻毎の解析に用いる共通のデータが多くなるため、状態量の追従性は悪くなる。

4) の n は、状態量の収束性に関与するが、追従性にはほとんど関係ない。

以上のローカルな繰り返し過程における重み: r 、解析データ数: m 、およびローカルな繰り返し数: n を適切に設定すれば、同定パラメータの時間変動に対する追従性が良くなり、精度の良い履歴復元力特性の推定が行える。

4. 解析条件および同定結果

(1) 解析条件

観測記録として使用する鉛直アレー観測記録について述べる。本研究では、土の非線形履歴復元力を同定することを目的とするため、マグニチュードおよびアレー最上点で観測された最大加速度が大きい記録を選択して用いる。使用する鉛直アレー観測記録⁵⁾は、東京大学生産技術研究所 (千葉実験所構内観測点) の記録 (SKN)、および兵庫県南部地震における神戸ポートアイランドの記録 (KBP) の2つとする。その諸元を表-1に示す。これらの中で、神戸ポートアイランドの記録 (KBP) は、観測中に地盤が液状化しており、その非線形挙動を捉えている

表-1 対象地震の諸元

地震名	マグニチュード	最大加速度 (gal)
SKN	6.7	240.24
KBP	7.2	341.22

表-2 初期値の設定

地震名	f_0	h
SKN	2.5	0.04
KBP	2.0	0.10

という点で貴重な記録である。

なお、上記2つの鉛直アレー観測記録は絶対加速度記録であり、各観測記録における時間刻みは、 $\Delta t = 0.005 \text{ sec}$ とした。

解析では、EK-WLI法により、等価ばね定数 k_e および等価減衰係数 c_e が同定され、式(7)より履歴復元力が推定される。これらの等価線形パラメータを次式で表わす。

$$\begin{cases} c_e = 2h\omega_0 \\ k_e = \omega_0^2 \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 h は粘性減衰定数、 $\omega_0 = 2\pi f_0$ は固有円振動数、 f_0 は固有振動数である。これらの初期値には、初期の小振幅の記録を用いて、ローカルな繰り返しを行わずに同定した場合に得られた値を用いる。表-2はこのようにして得られた f_0 および h である。これらを初期値として、強震領域の同定を行なう。また、質量 m については $m=1$ とする。

(2) 同定結果

EK-WLI法のローカルな繰り返し過程に用いるパラメータを以下のように変化させ解析を行った。

重み: $r=1.2 \sim 10.0$

解析データ数: $m=5 \sim 100$ 個

ローカルな繰り返し数: $n=1 \sim 5$ 回

以下では、SKN、および KBP の2つの観測記録に対する同定結果について、相対変位波形の一致度から判断して、最も精度が良いと考えられる結果について述べる。相対変位の同定結果を図-3に示す。図には、観測波形と同定波形を対比して示した。

観測記録として SKN を用いた場合には、同定波形と観測波形の一致度は悪い (図-3(a))。これは、観測記録 SKN が高周波数成分を多く含むため、波形の時間変動に追従できないためと考えられる。他方、神戸ポートアイランドの記録 (KBP) を用いた同定では、同定波形と観測波形は、ほぼ完全に一致している (図-3(b))。

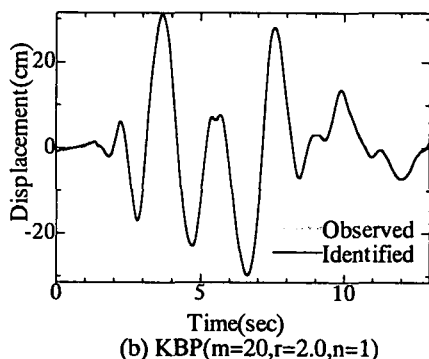
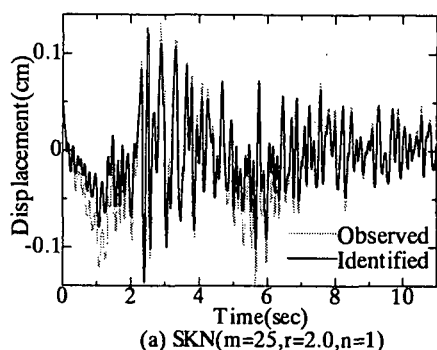


図-3 相対変位の同定結果

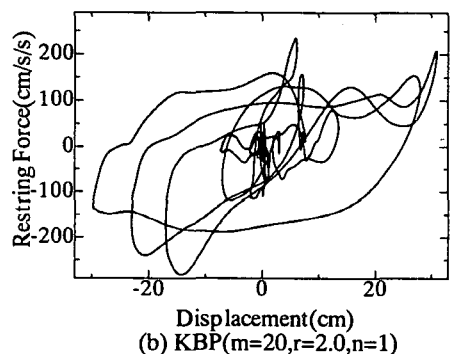
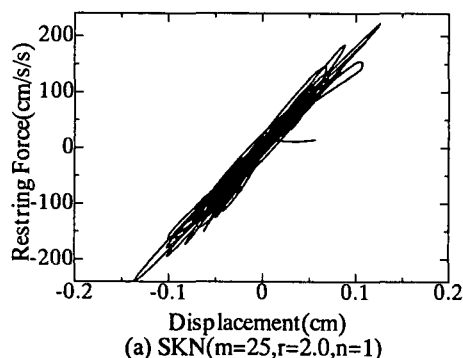


図-4 履歴復元力の同定結果

図-4 には、履歴復元力の同定結果を示す。
図-4 (a) より、SKN の地盤の履歴復元力はほぼ

線形になることがわかる。これは、この地盤が比較的固く、強震時でも顕著な非線形を示さないためであると考えられる。他方、KBP の地盤では、履歴復元力が顕著な非線形性を示す (図-4 (b))。

このように、EK-WLI 法を用いることにより、強震時の軟弱地盤の非線形履歴復元力を同定することができる。

5. 結論

本研究で得られた結果を要約すれば以下のようになる。

1. EK-WLI 法を用いた等価線形的同定により、強震時の土の非線形履歴復元力特性を推定することができる。
2. 強震時の実地盤の履歴復元力を同定した結果、比較的固い地盤ではほぼ線形的な挙動をするのに対し、軟弱な地盤では顕著な非線形性が現れた。

謝辞：本研究で使用した鉛直アレー観測記録は (財) 震災予防協会発行の強震動アレー観測記録データベースに収録されたものであることを記して、関係者の方々に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 澤田・原井・平尾・成行・辻原：カルマンフィルタによる非線形 1 自由度系の等価線形的同定，応用力学論文集，Vol.1，pp.99-108，1998。
- 2) 星谷・斎藤：拡張カルマンフィルタを用いた同定問題の各種振動系への応用，土木学会論文報告集，No.339，pp.59-67，1983。
- 3) 星谷・斎藤：液状化を伴う地盤の等価線形化，土木学会論文集，No.340，pp.59-65，1983。
- 4) 須藤・星谷：拡張カルマンフィルタの基本的考察と EK-WLI 法の提案，土木学会論文集，No.437/I-17，pp.203-211，1991。
- 5) (財) 震災予防協会：強震動アレー観測記録データベース，No.1,1993，No.2,1995。